



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

## MIKROSTRUKTURA SLITINY ALSI9CU3 ZPRACOVANÁ TECHNOLOGIÍ SLM

MICROSTRUCTURE OF ALSI9CU3 ALLUMINIUM ALLOY PROCESSED BY  
SLM TECHNOLOGY

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Rychnovský

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kristýna Vašáková

BRNO 2021



## Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav materiálových věd a inženýrství
Student:	<b>Daniel Rychnovský</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Kristýna Vašáková</b>
Akademický rok:	2020/2021

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Mikrostruktura slitiny AlSi9Cu3 zpracovaná technologií SLM**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Slitina AlSi9Cu3 je jednou z nejběžněji používaných hliníkových slitin zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Konvenčně se vyrábí vysokotlakým litím, přičemž s nástupem nových aditivních technologií je možnost tuto slitinu vyrábět i procesem SLM.

Základním požadavkem pro dosažení dobrých mechanických vlastností je výroba dílů o vysoké relativní hustotě. V rámci bakalářské práce bude zjišťován vliv procesních parametrů SLM procesu na relativní hustotu vyráběných vzorků studované slitiny. Získané výsledky metalografické analýzy aditivně zpracované slitiny budou srovnávány s mikrostrukturou identické slitiny vyrobené odléváním.

#### **Cíle bakalářské práce:**

- 1) V rámci literární rešerše srovnat hodnoty mechanických vlastností a detaily mikrostruktury slitiny AlSi9Cu3 zpracovávané konvenčními technologiemi a procesem SLM.
- 2) Zjištění vlivu procesních parametrů na relativní hustotu vyrobených vzorků s využitím obrazové analýzy.
- 3) Získané výsledky diskutovat s dostupnými literárními zdroji.

### Seznam doporučené literatury:

OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE and K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. Progress in Materials Science, 74 (2015), 401–477. ISSN 0079-6425.

FOUSOVA, M., D. DVORSKY, M. VRONKA, D. VOJTECH and P. LEJCEK. The Use of Selective Laser Melting to Increase the Performance of AlSi9Cu3Fe Alloy. Materials, 2018, 11(10). DOI: 10.3390/ma11101918. ISSN 1996-1944.

FIOCCHI, J., C. A. BIFFI and A. TUISSI. Selective laser melting of high-strength primary AlSi9Cu3 alloy: Processability, microstructure, and mechanical properties. Materials & Design, 2020, s. doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108581. ISSN 02641275.

SUCHY, J., L. PANTELEJEV, D. PALOUSEK, D. KOUTNY and J. KAISER. Processing of AlSi9Cu3 alloy by selective laser melting. Powder Metallurgy, 2020, 63(3), s. 197-211. doi.org/10.1080/00325899.2020.1792675. ISSN 0032-5899.

TAKATA, N., H. KODAIRA, K. SEKIZAWA, A. SUZUKI and M. KOBASHI. Change in microstructure of selectively laser melted AlSi10Mg alloy with heat treatments. Materials Science and Engineering: A, 2017, 704, 218-228. DOI: 10.1016/j.msea.2017.08.029. ISSN 09215093.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá mikrostrukturou hliníkové slitiny AlSi9Cu3 vyrobenou metodou SLM. V rešeršní části bakalářské práce je představen princip metody SLM. V návaznosti na to jsou zmíněny vady, které mohou nastat při výrobě součástí metodou SLM. V závěru rešeršní části jsou srovnány mechanické vlastnosti a mikrostruktura materiálů vyrobených metodou SLM a materiálů vyrobených konvenčními technologiemi (odléváním). V experimentální části bakalářské práce je zkoumána porozita vyrobených vzorků metodou SLM pomocí obrazové analýzy. Součástí experimentální části je hodnocení mikrostruktury. Dosažené výsledky jsou diskutovány s literárními zdroji.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Selektivní laserové tavení (SLM), slitina AlSi9Cu3, mikrostruktura, obrazová analýza, porozita

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with microstructure of aluminium alloy AlSi9Cu3 produce by SLM process. In theoretical part the SLM process is shown. In following topic, the defects which can occur during SLM are mentioned. In the end of the theoretical part the materials made by SLM and materials made by conventional method (casting) are compared. In experimental part the porosity of the samples made by SLM is examined by image analysis. The examine of the microstructure is also included. Results are discussed with literature.

## **KEY WORDS**

Selective laser melting (SLM), AlSi9Cu3 alloy, microstructure, image analysis, porosity



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

RYCHNOVSKÝ, Daniel. *Mikrostruktura slitiny AlSi9Cu3 zpracovaná technologií SLM*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132880>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Kristýna Vašáková.





### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Mikrostruktura slitiny AlSi9Cu3 zpracovaná technologií SLM* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury, uvedené v seznamu, který tvoří součást této práce.

V Brně dne 21.5.2021

.....  
Daniel Rychnovský



## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval paní Ing. Kristýně Vašákové za odborné rady, věcné připomínky a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během celého studia.



# Obsah

1 Úvod .....	14
2 Aditivní výroba.....	16
2.1 Rozdělení aditivních technologií .....	16
3 Selektivní laserové tavení (SLM).....	18
3.1 Vady vzniklé při SLM .....	19
3.1.1 Zbytková napětí.....	19
3.1.2 Tvorba kulových částic .....	20
3.1.3 Porozita.....	21
3.1.4 Oxidické vměstky.....	22
3.1.5 Ztráta legujících prvků .....	23
3.1.6 Trhliny.....	23
4 Hliník a slitiny hliníku.....	24
4.1 Slitiny hliníku .....	24
4.1.1 Slitiny hliníku pro tváření .....	25
4.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky .....	25
4.2 Vybrané hliníkové slitiny.....	26
4.2.1 Slitina AlSi9Cu3 .....	26
4.2.2 Slitina AlSi10Mg .....	28
5 Experimentální část .....	30
5.2 Experimentální technika a postup prací.....	30
5.3 Charakteristika vstupního prášku.....	31
6 Výsledky.....	32
7 Diskuze .....	35
8 Závěr.....	38
9 Seznam použité literatury .....	39
10 Seznam použitých zkratk a symbolů .....	42
11 Seznam obrázků.....	43
12 Seznam tabulek.....	44

# 1 Úvod

Aditivní výroba (AM) je poměrně nová technologie založená na postupném nanášení a vytvrzování vrstev materiálu. Jako vstupní materiál lze použít kovy, plasty, keramiku a další. Tyto vstupní materiály mohou být ve formě jak prášku, tak filamentu. Díky tomu, že je materiál nanášen vrstvu po vrstvě, lze vyrobit dílce se složitou geometrií, kterou konvenčními metodami nelze vyrobit nebo lze vyrobit jen velmi obtížně. Navíc dílce vyrobené technologií AM se velmi podobají tvaru finální součásti, což výrazně redukuje potřebu je dále zpracovávat. To má za následek snížení celkového času výroby. Díly vyrobené AM se používají v různých odvětvích, například v automobilovém průmyslu, v medicíně nebo v kosmickém průmyslu. [1, 2]

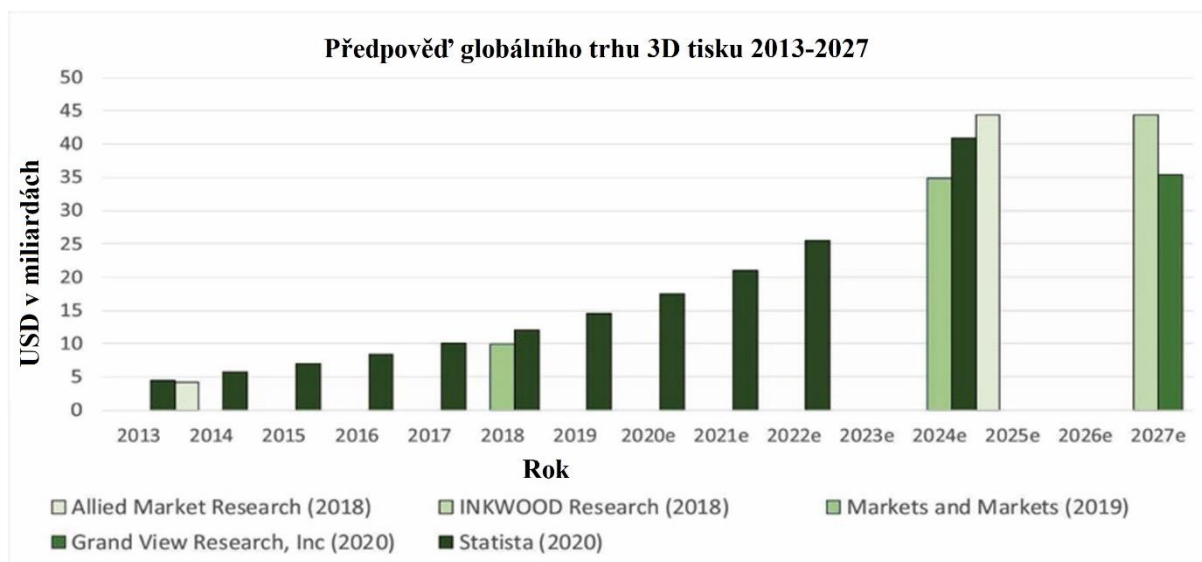
Selektivní laserové tavení (SLM) je metoda AM, která je založena na principu tavení kovového prášku. Patří mezi metody AM, které mají nejslibnější budoucnost. Součásti vyrobené metodou SLM mohou vykazovat lepší vlastnosti, než je tomu u součástí vyrobených konvenčními technologiemi např. u nerezavějící oceli 316 L, která se používá v medicíně, byla zjištěna lepší korozní odolnost a biokompatibilita. [2, 3]

Velká pozornost je věnována výrobě hliníkových slitin metodou SLM. Hliníkové slitiny jsou ve strojírenství velmi používané materiály, zejména v automobilním, leteckém či kosmickém průmyslu. Hliníkové slitiny jsou vyhledávány především kvůli jejich nízké hmotnosti, dobrému poměru pevnosti ku hmotnosti, dobré korozní odolnosti a tažnosti. Hliníkové slitiny se konvenčně vyrábí především litím nebo tvářením. Ale před několika lety, se tyto slitiny začaly vyrábět i pomocí metody SLM. Slitiny hliníku byly jedny z prvních, které se touto metodou začaly vyrábět. Zejména jsou používány hliníkové slitiny systémů Al-Si, Al-Si-Mg a Al-Mg-Sc. Příkladem jsou slitiny AlSi12 a AlSi10Mg. Tyto slitiny jsou vyhledávány zejména díky jejich odolnosti vůči vzniku trhlin během procesu SLM. Po tepelném zpracování, slitiny AlSi12 a AlSi10Mg vyrobené metodou SLM dosahují pevnosti v tahu kolem 350 MPa a meze kluzu kolem 250 MPa. V této bakalářské práci je zkoumána slitina AlSi9Cu3. Tato slitina je jednou z nejvíce používaných hliníkových slitin a konvenčně se vyrábí vysokotlakým litím. [4, 5, 6]



## 2 Aditivní výroba

Aditivní výroba byla poprvé představena před více než třemi desetiletími, kdy byl uveden první patent na Stereolitografii (SLA) v roce 1986 Charlesem (Chuckem) Hullem. Proces byl poprvé popsán jako Rychlé prototypování a výroba („Rapid Prototyping and Manufacturing“). Proces rychlého prototypování zahrnuje použití počítačově vytvořeného 3D modelu, který je následně pomocí standartního teslačního souboru (STL) rozřezán na 2D vrstvy. Postupným nanášením jednotlivých vrstev materiálu na sebe vznikne celá součást. V nedávné době důležité patenty v oblasti AM začaly ztrácet platnost. Tato událost umožnila vznik novým společnostem, které se snaží vyplnit mezeru na trhu pomocí rychlé a snadné stolní výroby zejména v oblasti polymerních materiálů. Od roku 2013 to vedlo k 12-17% nárůstu výnosů ročně a v roce 2027 se předpokládá výnos 44,6 miliard dolarů viz Obr. 1. Všechny modely trhu zdůrazňují novinku kovového 3D tisku. [7]



Obr. 1: Předpověď globálního trhu [7]

### 2.1 Rozdělení aditivních technologií

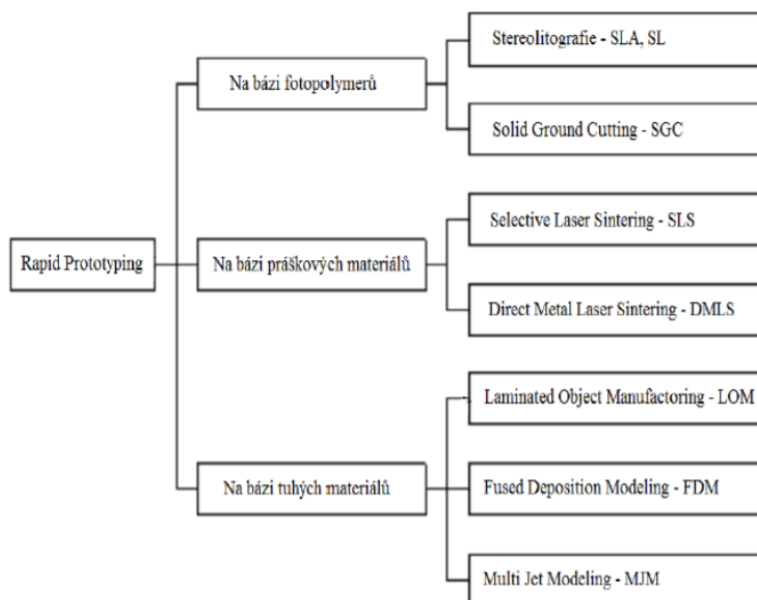
Aditivní technologie jsou rozděleny podle normy ISO / ASTM 52900 do sedmi kategorií:

- fotopolymerizace („Vat Photopolymerization“ (VPP)),
- vytlačování materiálu („Material Extrusion“ (MEX)),
- vstřikování materiálu („Material Jetting“ (MJT)),
- tryskání pojiva („Blender Jetting“ (BJT)),
- spékání práškové vrstvy („Powder Bed Fusion“ (PBF)),
- laminace plátů („Sheet Lamination“ (SHL)),
- přímá depozice materiálu („Direct Energy Deposition“ (DED)).



Kromě zmíněných technologií jsou zde i další technologie zpracovávající keramiku, kovy nebo kompozity [7]. AM lze také rozdělit podle stavu výchozího materiálu do 3 skupin viz obr.2 [8]:

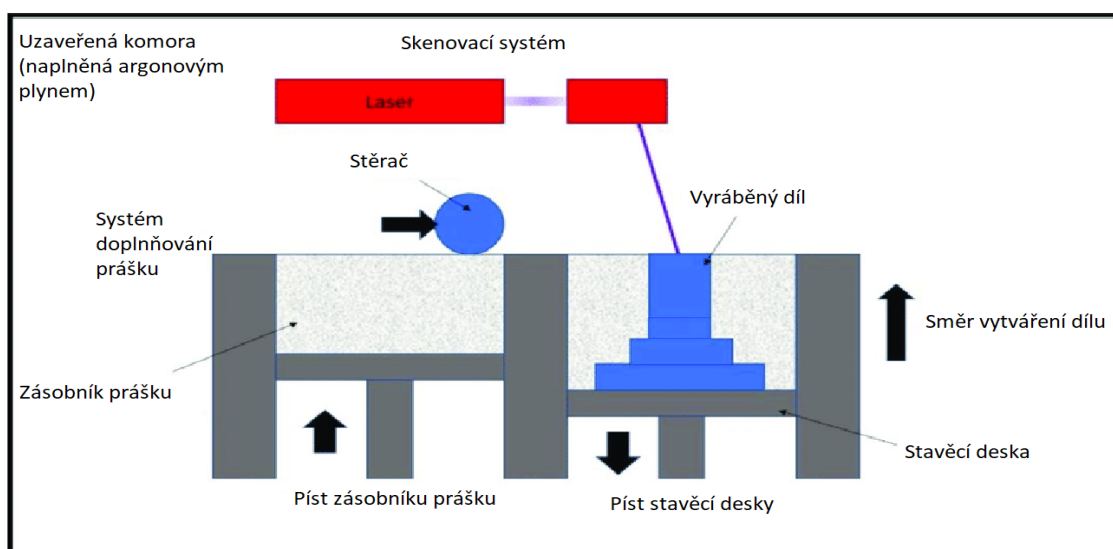
- materiály na bázi fotopolymerů,
- materiály na bázi práškových materiálů,
- materiály na bázi tuhých materiálů.



*Obr. 2: Rozdělení aditivních technologií [8]*

### 3 Selektivní laserové tavení (SLM)

Selektivní laserové tavení je metoda AM, při které dochází k natavení a spojení kovového prášku pomocí vysoce výkonného laseru. Samotný proces začíná vytvořením 3D modelu součásti na počítači. Následně je 3D model pomocí specializovaného softwaru rozřezán na vrstvy. Princip metody SLM je znázorněn na obr. 3 a spočívá v nanesení vrstvy kovového prášku na stavěcí desku. Vrstva kovového prášku je následně lokálně roztavena jedním nebo více lasery. Tímto způsobem je vytvořena první vrstva. Poté se stavěcí deska sníží o tloušťku vrstvy a nanese se nová vrstva prášku, která je zarovnána stěračem a celý proces je opakován, dokud není vyrobena celá součást. Plocha průřezu 3D dílu je vytvářena tavením a opětovným tuhnutím kovového prášku v každé vrstvě. [9, 10]



Obr. 3: Schéma zařízení pro selektivní laserové tavení [11]

Většina komerčních SLM systémů používá prášky s velikostí částic od 20 do 50  $\mu\text{m}$  a velikost vrstvy se pohybuje od 20 do 100  $\mu\text{m}$ . Metodou SLM lze zpracovávat hliník, titan, chrom, korozi-vzdornou ocel, nástrojovou ocel a další. Přestože lze většinu nepoužitého prášku recyklovat pro další použití v AM, určitá úroveň ztráty materiálu nastává, když je prášek kontaminován nebo zoxiduje během procesu tavení, a proto se stává nerecyklovatelným. K potlačení zmíněných nežádoucích vlivů je před samotným tiskem komora naplněna inertním plynem (argon, dusík), čímž se sníží úroveň kontaminace a oxidace v průběhu výroby. [9, 10]

Proces SLM má také určitá omezení pro vytváření libovolně navržených tvarů. V současné době je náročné vyrábět převisy nebo horizontální vzpěry, hlavně kvůli špatnému vedení tepla v práškové loži bezprostředně pod nově ztuhlými vrstvami odkrytého prášku. [10]

Procesní parametry hrají důležitou roli v procesu tavení a tuhnutí. Nevhodné zvolení procesních parametrů může způsobit nestabilní tavnou lázeň, která může způsobit geometrické a mikrostrukturní vady, jako například: neúplné natavení, zbytková napětí,

tvorbu kulových částic, pórovitost a trhliny. Proto je klíčové získat stabilní tavnou lázeň v procesu SLM, aby se zlepšilo spojování vrstev a relativní hustota vyráběných komponentů. Průvodním indexem získaným z předdefinovaných parametrů skenování je hustota energie, kterou lze vyjádřit pomocí vztahu [9]:

$$E_v = \frac{P}{v \cdot t \cdot h} \quad [\text{J/mm}^3], \quad (1)$$

kde  $P$  je výkon laseru [W],  $v$  je rychlost skenování [mm/s],  $t$  je tloušťka vrstvy [mm] a  $h$  rozteč skenování [mm]. Z rovnice (1) je zřejmé, že při nízkém výkonu laseru a vysoké rychlosti skenování dojde k nízké hustotě energie, a to vede k nedostatečnému roztavení a vysoké porozitě. [9]

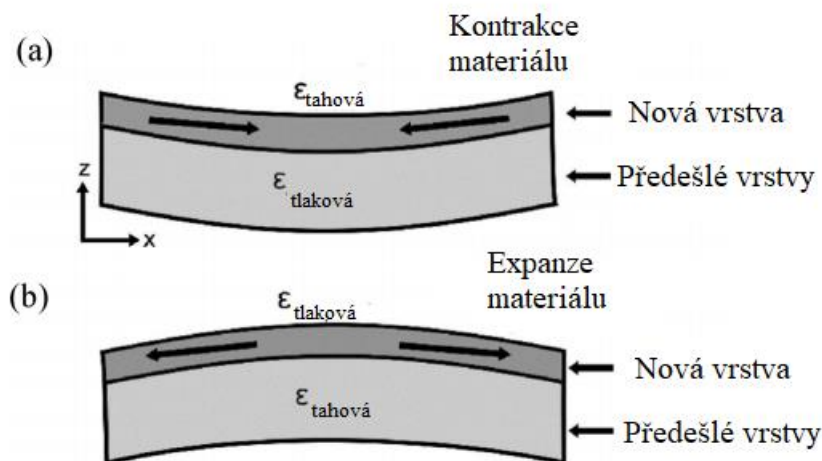
### 3.1 Vady vzniklé při SLM

V průběhu výroby dílců metodou SLM mohou vzniknout vady, mezi které se řadí trhliny způsobené existencí zbytkových napětí, tvorba kulových částic, porozita a přítomnost oxidických vměstků. Dále může dojít ke ztrátě legujících prvků. Tyto vady budou popsány podrobněji níže.

#### 3.1.1 Zbytková napětí

Teplotní namáhání nastává, když je znemožněno materiálu se roztahovat nebo smršťovat v reakci na lokální změnu teploty (příkladem může být tavení v důsledku záření laseru). Během procesu SLM je práškový materiál vystaven cyklickému, intenzivnímu, nestabilnímu ohřívání a tuhnutí. Nestabilní termodynamický stav v tuhé fázi v procesu SLM je velmi podobný stavu, který se odehrává během laserového svařování. Na základě analogie termomechanických podmínek jsou znalosti o vzniku zbytkového napětí při laserovém svařování užitečné i pro proces SLM. Teplotní namáhání je způsobeno teplotním gradientem nebo smršťováním tuhajícího materiálu, přičemž snížením teplotního namáhání snížíme i zbytkové napětí. [12, 13]

Mercelis a Kruth [14] se zabývali mechanismem kritického teplotního gradientu (TGM) a mechanismem ochlazování, tyto mechanismy vysvětlují vznik zbytkového napětí v součásti vytvořené metodou SLM. Laser s vysokou energetickou intenzitou rychle roztaví vrstvu prášku a v místě působení paprsku dochází k tepelné roztažnosti ztuhlé fáze působením laserového záření. S pohybujícím paprskem se dříve zahřívající oblast začíná ochlazovat a smršťovat. Naproti tomu je smršťování omezeno dříve ztuhlým materiálem, který v této oblasti vyvolá zbytková tahová napětí, obr. 4 ukazuje napětí vzniklá (a) ochlazováním a (b) ohřevem. S cyklickým nanášením prášku vrstvu po vrstvě se souvisle akumuluje tlakové napětí uvnitř materiálu tak, aby se vyrovnalo s tahovým napětím v blízkosti povrchu. [12, 13]



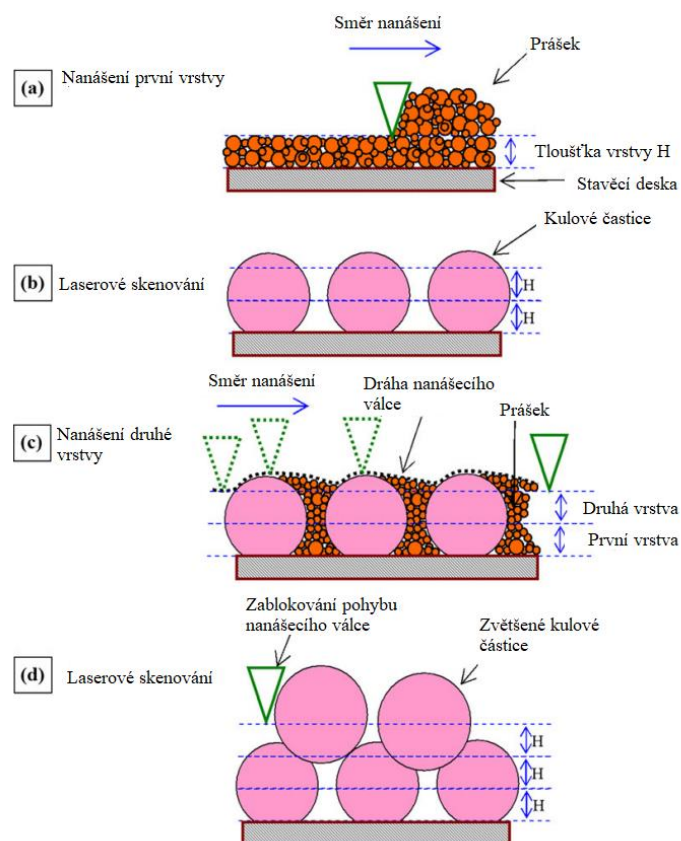
Obr. 4: Vývoj napětí během procesu AM při (a) ochlazování (termální komprese) a (b) ohřevu (termální expanze) nové vrstvy [15]

### 3.1.2 Tvorba kulových částic

Tvorba kulových částic je typický jev pro SLM a má negativní vliv na formování součásti. U nerezavějící oceli a čistého niklu bylo zjištěno, že tento jev lze rozdělit obecně na dva druhy:

- elipsoidní koule o rozměru přibližně 500  $\mu\text{m}$ ,
- sférické koule o rozměru přibližně 10  $\mu\text{m}$ .

Tvorba elipsoidních koulí je způsobena nedostatečnou smáčivostí povrchu a představuje vážný problém při nanášení nových vrstev. Naproti tomu tvorba sférických koulí nemá negativní účinek na kvalitu procesu SLM. Smáčivost povrchu lze zlepšit užitím většího výkonu laseru a snížením skenovací rychlosti, nicméně pokud je výkon laseru příliš vysoký, nadměrné množství roztaveného kovu povede nejen k tvorbě kulových částic, ale také k deformaci vyráběné součásti v důsledku vzniku zbytkových napětí. Smáčivost lze také zlepšit předehřátím stavěcí desky (předehřívací teploty pro slitiny hliníku se nachází v rozmezí 50-200  $^{\circ}\text{C}$ ). Důležitý vliv má při tvorbě kulových částic kyslík. Snížením jeho obsahu pod 0,1 % v komoře zařízení výrazně sníží iniciaci tohoto jevu. Na obr. 5 je ukázáno, jak může tvorba kulových částic ovlivnit výrobu dílu. Část (a) znázorňuje nanášení vrstvy prášku o tloušťce  $H$ , v části (b) laserové skenování zapříčinilo tvorbu kulových částic, které převyšují tloušťku vrstvy  $H$ , v části (c) se nanášecí válec (stěrač) v důsledku vzniku kulových částic pohybuje střídavě nahoru a dolů a dochází k nerovnoměrnému nanesení prášku jehož tloušťka převyšuje  $2H$ , v části (d) je nanášecí válec (stěrač) zablokován v důsledku nahromadění kulových částic. [16, 17]



Obr. 5: Schéma znázorňující zablokování pohybu nanášecího válce(stěrače) v důsledku tvorby kulových částic [16]

### 3.1.3 Porozita

Jedním z klíčových defektů ovlivňující výslednou hustotu a mechanické vlastnosti součásti vyrobené procesem SLM je porozita [18]. Póry vznikající během procesu SLM lze rozdělit do dvou kategorií:

- póry nepravidelného tvaru — „lack of fusion porosity“, „keyhole porosity“, „shrinkage porosity“.
- póry kulovitého tvaru — plynné póry.

Póry nepravidelného tvaru vznikají při neúplném roztavení práškového materiálu („lack of fusion porosity“). Nejčastěji se formují na hranicích mezi vzniklými vrstvami. Póry nepravidelného tvaru vznikají i v důsledku efektu klíčové dírky a jsou označovány jako „keyhole pores“. Tyto „keyhole pores“ se formují, když je hustota energie příliš vysoká. Dalším způsobem, jakým póry nepravidelného tvaru vznikají, je smrštění materiálu během tuhnutí („shrinkage porosity“). Ty vznikají kvůli nedostatečnému přísunu tekutého kovu v průběhu tuhnutí. Procesní parametry (rychlost skenování, tloušťka vrstvy, výkon laseru, rozteč skenování) mají velký vliv na velikost a počet pórů nepravidelného tvaru vzniklých během procesu SLM. [19, 20]

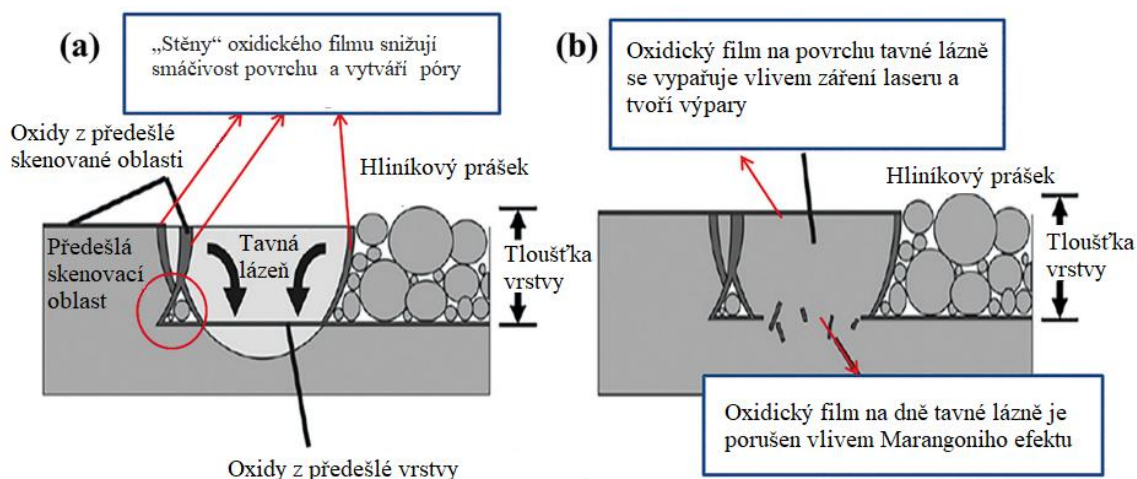
Póry kulovitého tvaru (plynné póry) vznikají převážně kvůli inertnímu plynu v ochranné atmosféře, který se dostane do tavné lázně díky povrchovému víření. Na vznik plyných pór má vliv i plyn obsažený v mezerách mezi částicemi prášku. Dalším mechanismem vzniků plyných pór je, když se výpary sloučenin s nižší teplotou tavení nemohou uvolnit z tavné lázně. [17]

### 3.1.4 Oxidické vměstky

Povrchový oxidický film způsobuje zpomalení zhutňovacího mechanismu tvořením kulových částic. I když je součást v průběhu procesu SLM chráněna ochranou atmosférou, stále je v komoře zařízení přítomen kyslík v obsahu přibližně 0,1 %, který je obsažen v mezerách mezi částicemi prášku. Oxidy se do součásti dostávají dvěma způsoby:

- oxidací surového materiálu,
- skrze kyslík obsaženým v ochranné atmosféře, který se do součásti dostane skrze povrchové turbulentní proudění v tavné lázni.

Oxid hlinitý vzniklý během SLM procesu hliníkových slitin brání spojení částic prášku, tím přispívá k tvoření kulových částic a zhorší zhutnění součásti. Oxidické vměstky jsou často zdrojem iniciace trhliny, a to snižuje mechanické vlastnosti vyrobené součásti. Louvis a kol. [21] použili roztok hydroxidu sodného k hloubkové korozi hliníkové slitiny 6061, a tím objevili oxidační mechanismus a morfologii oxidického filmu součásti vyrobené SLM. Na obr.6 je znázorněno, že oxidické filmy se mohou vytvářet na všech stranách tavné lázně. Oxidické filmy v horních vrstvách se vypaří a unikají z tavné lázně. Oxidické filmy ve spodních vrstvách tavné lázně jsou porušeny v důsledku Marangoniho efektu. Vlivem těchto oxidických filmů se snižuje smáčivost taveniny a stavěcí desky, a překrývající se části sousedních drah tvoří uzavřené nebo polo-uzavřené póry, ve kterých může být roztavená nebo neroztavená částice prášku. Abychom snížili oxidaci v procesu SLM, prášek musí být suchý a čistý, protože vlivem záření laseru se může vlhkost na povrchu prášku změnit na vodík (který způsobuje porozitu) a kyslík (který společně s hliníkem vytváří oxid hlinitý). [17]



Obr. 6: Formovací mechanismy a morfologie oxidického filmu. (a) Narušení tavné lázně oxidy. (b) Stěny oxidického filmu [17]

### 3.1.5 Ztráta legujících prvků

Díky vysoké hustotě energie (vznikající během laserem zpracovaných dílů), může dojít k selektivnímu vypařování legujících prvků, které mají nižší teplotu tavení než hliník. Selektivní vypařování legujících prvků vede k degradaci funkčních vlastností laserem zpracovaných dílů. Vypařováním hořčíku nebo zinku z hliníkové slitiny dojde k omezení vlivu precipitačního zpevnění, a to vede ke snížení pevnosti a tvrdosti. Kvůli úbytku legujících prvků také dojde k nestabilitě skenovací stopy a vysokému stupni porozity, a proto musí být vypařování těchto prvků redukováno. Toho lze dosáhnout kontrolou hustoty energie vyzařované laserem, kterou můžeme zajistit přidáním pulzních parametrů během laserového procesu. Díky tomu lze regulovat teplotu tavné lázně a snížit ztrátu legujících prvků. [17, 19]

### 3.1.6 Trhliny

Trhliny v procesu SLM mohou vznikat v důsledku přítomnosti zbytkových napětí, které vznikají při cyklickém tání a tuhnutí práškového materiálu. Vlastnosti hliníku jako je vysoká tepelná vodivost, široký rozsah teplot tuhnutí a vysoký koeficient tepelné roztažnosti podporují vznik trhlin v hliníkových slitinách během procesu SLM. Přidáním legujících prvků, které zúží rozsah teplot tuhnutí (hořčík), dojde k omezení vzniku trhlin. [17]

## 4 Hliník a slitiny hliníku

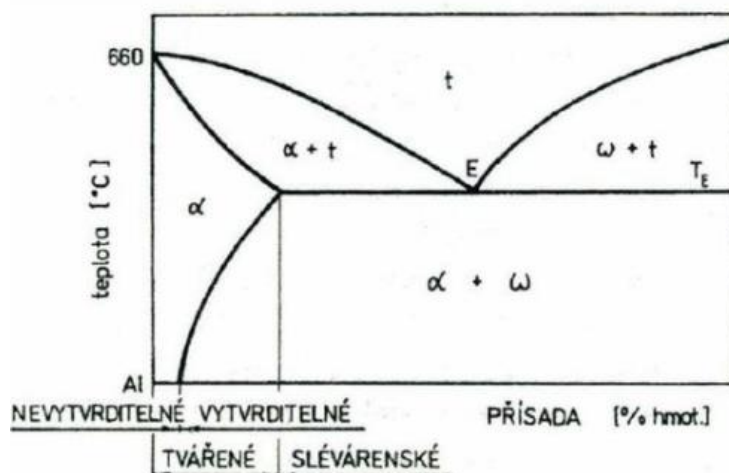
Hliník je neželezný kov šedé barvy. V přírodě se nachází přibližně v 250 různých minerálech, ale nejvýznamnějším minerálem, ze kterého se hliník vyrábí, je bauxit. Hliník má kubickou plošně centrovanou krystalovou mřížku (FCC). Řadí se do skupiny lehkých kovů. Má výbornou tepelnou a elektrickou vodivost. Hliník je měkký, tvárný a odolný vůči korozi. Na vzduchu je stálý, díky vrstvě  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , která se vytváří pasivací na povrchu. Vybrané vlastnosti hliníku jsou zobrazeny v tab. 1. Hliník je používán v elektrotechnice, potravinářském či chemickém průmyslu. Využívá se pro obaly nebo jako plátování plechů. Abychom mohli hliník použít jako konstrukční materiál, musíme ho legovat (kvůli jeho nízké pevnosti). [22-24]

Tab. 1: Vlastnosti hliníku [24]

Teplota tání	660 °C
hustota	2690 kg/m <sup>3</sup>
modul pružnosti v tahu	71 GPa
mez pevnosti v tahu	70 MPa (vyžíhaný stav)
mez kluzu	20 MPa (vyžíhaný stav)
tažnost	20-30 % (vyžíhaný stav)
tvrdost	20 HB (vyžíhaný stav)

### 4.1 Slitiny hliníku

Po oceli jsou slitiny hliníku nejvíce používaným konstrukčním materiálem. Slitiny hliníku nejčastěji dělíme podle způsobu zpracování do dvou skupin, a to na slitiny hliníku pro tváření a na slitiny hliníku pro odlévání. Taktéž se dají dělit na vytvrditelné a nevytvrditelné. Dělení slitin je graficky znázorněno v obecném rovnovážném diagramu binární slitiny hliníku na obr. 7. [22]



obr. 7: Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku [22]



### 4.1.1 Slitiny hliníku pro tváření

Tuto skupinu slitin lze rozdělit na dvě podskupiny:

- slitiny nízkopevnostní s dobrou odolností vůči korozi,
- slitiny s vyšší a vysokou pevností, avšak s nízkou odolností vůči korozi.

V první skupině se nacházejí slitiny soustav Al-Mg a Al-Mn. Tyto slitiny neobsahují měď, a díky tomu mají dobrou odolnost vůči korozi. Avšak nedochází u nich k výraznému zpevnění po tepelném zpracování. K vlastnostem těchto slitin patří:

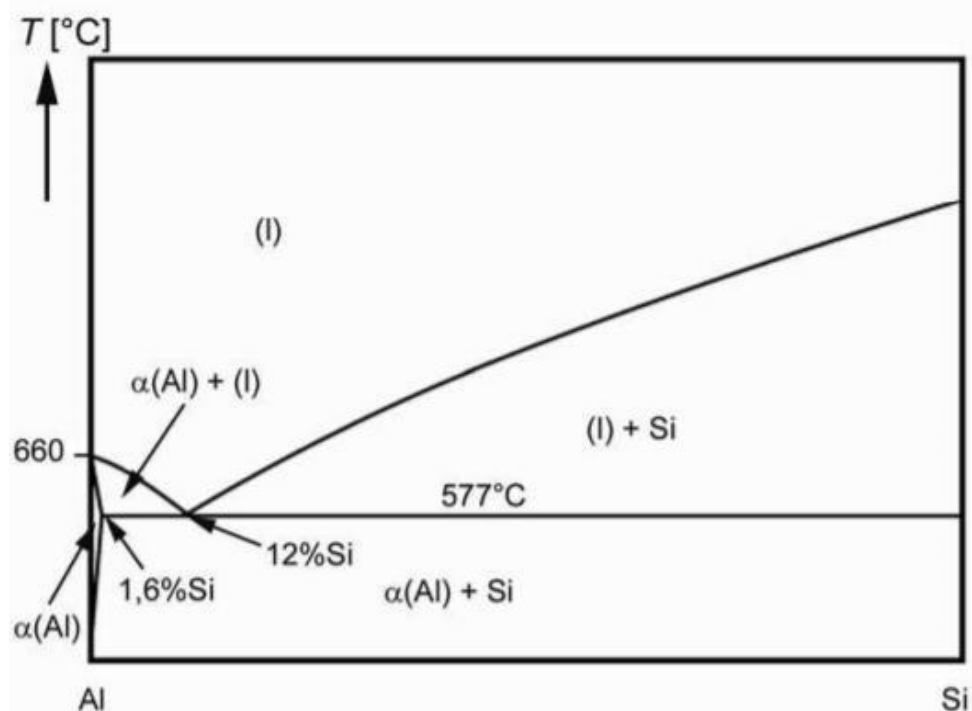
- dobrá svařitelnost,
- tvářitelnost,
- odolnost vůči vibračnímu zatížení,
- dobrá lomová houževnatost.

Tyto slitiny se používají na části lodních trupů kvůli odolnosti vůči mořské vodě. Do první skupiny patří i slitiny Al-Mg-Si, u kterých, dochází k patrnému zpevnění po tepelném zpracování ( $R_m=170$  až  $270$  MPa). Na vytvrzení těchto slitin má vliv fáze  $Mg_2Si$ . Používají se ve stavebnictví a bytové architektuře. [22]

Do druhé skupiny patří slitiny Al-Cu, Al-Cu-Mg, které se označují jako duraly. U těchto slitin dochází ke zpevnění po tepelném zpracování a mez pevnosti dosahuje hodnot až  $450$  MPa. Tyto slitiny nemají dobrou korozní odolnost kvůli obsahu mědi, a proto se, pokud jsou vystavovány koroznímu prostředí, pokrývají tenkou vrstvou hliníku. Duraly se používají například v leteckém průmyslu či v automobilovém průmyslu. Dále do druhé skupiny patří i slitiny Al-Li. Tyto slitiny jsou o 5 až 10 % lehčí než konvenční slitiny hliníku. Modul pružnosti u těchto slitin dosahuje hodnot od  $77,5$  do  $81,2$  GPa a mez pevnosti  $420$  až  $600$  MPa. Jejich hlavní nevýhodou je nízká tažnost a vysoká křehkost. [22, 24]

### 4.1.2 Slitiny hliníku pro odlitky

Slitiny Al-Si, označované jako siluminy, jsou nejvýznamnější skupinou slitin hliníku na odlitky. Binární siluminy Al-Si (binární rovnovážný diagram je zobrazen na obr.8) se rozděluje na podeutektické (pod  $11,7$  hm. % Si), eutektické (kolem  $11,7$  hm. % Si) a nadeutektické (od  $11,7$  do  $24$  hm. % Si). Nejlepší slévárenské vlastnosti mají eutektické siluminy, díky úzkému teplotnímu intervalu tuhnutí. Dále se binární slitiny Al-Si vyznačují dobrou korozní odolností. Na odlévání tvarových odlitků se používají převážně tzv. siluminy speciální. Na zlepšení pevnostních vlastností těchto slitin mají největší vliv legující prvky hořčík a měď. Díky těmto legurám lze tyto slitiny vytvrzovat. Speciální siluminy mají horší slévárenské vlastnosti než binární siluminy. Přidáním dalších legujících prvků vznikají soustavy Al-Si-Cu-Mn, Al-Si-Cu-Mg-Ni, Al-Si-Cu-Zn, které mají lepší vlastnosti. [22, 24]



Obr. 8: Binární rovnovážný diagram Al-Si [24]

Ke zlepšení mechanických vlastností siluminů se využívá modifikace a očkování. Při modifikaci se do taveniny slitiny přidává modifikátor (stroncium, sodík, lithium). To způsobí zjemnění krystalů eutektického křemíku. Dojde ke zvýšení meze pevnosti a ke zvýšení tažnosti. Množství těchto přísad je velmi malé. U sodíku jsou to tisíciny % a u stroncia setiny %. Při očkování se do taveniny přidávají zárodky cizorodých částic, na kterých snadněji vznikají zárodky nových krystalů. Tím dojde ke zjemnění mikrostruktury. Jako očkovadlo se používá titan a bór (pro tvářené slitiny a podeutektické slitiny). Pro nadeutektické slitiny se jako očkovadlo používá fosfor. [24]

## 4.2 Vybrané hliníkové slitiny

V této podkapitole budou porovnány vlastnosti hliníkových slitin vyrobených metodou SLM a konvenčními technologiemi. Jedná se o slitiny AlSi9Cu3 a AlSi10Mg.

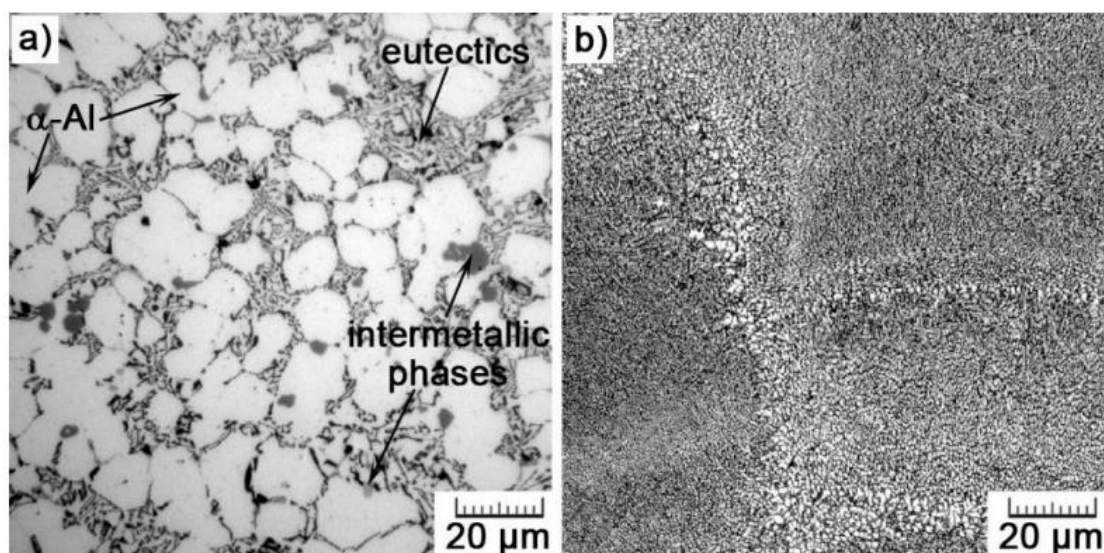
### 4.2.1 Slitina AlSi9Cu3

Tato slitina se konvenčně vyrábí vysokotlakým litím, ale v posledních letech se objevily studie zabývající se využitím této slitiny jako materiálu pro výrobu dílců pomocí metody SLM. Mezi její vlastnosti patří dobrá tepelná a elektrická vodivost, recyklovatelnost a výborný poměr pevnosti vůči hmotnosti. Měď v této slitině zvyšuje mez pevnosti, ale zároveň snižuje korozní odolnost. V porovnání se slitinou AlSi12 má o  $90\text{ MPa}$  větší pevnost v tahu. [25, 26]

Součásti vyrobené odléváním obsahují velké množství do jehlic zformovaného křemíku. Tyto jehlice představují koncentrátory napětí a při zatížení mohou iniciovat vznik trhliny. K vylepšení vlastností se používá očkování, díky kterému slitina získá

jemnější mikrostrukturu a dosahuje hodnot meze pevnosti 265 MPa a tažnosti 14,8 %. Stejných nebo i lepších hodnot lze dosáhnout vytvrzováním. [25]

Fousová a kol. [26] ve své studii porovnávali mikrostrukturu a mechanické vlastnosti slitiny AlSi9Cu3 vyrobené metodou SLM a vysokotlakým litím. Naměřené mechanické vlastnosti jsou zaznamenány v tab. 2. Z výsledků vyplývá, že vzorky vyrobené metodou SLM vykazují nárůst jak pevnostních vlastností, tak i nárůst tažnosti. Na obr. 9 je zobrazena mikrostruktura vzorku vyrobeného odléváním (obr. 9a) a vzorku, který byl zpracován procesem SLM (obr. 9b). Při odlévání vzniká dendritická struktura, naproti tomu při procesu SLM vzniká buněčná struktura. Při porovnání těchto dvou mikrostruktur bylo zjištěno, že vzorek vyroben metodou SLM má 18krát jemnější strukturu než vzorek vyrobený odléváním. Je to dáno tím, že při odlévání je rychlost ochlazování  $10^1$ – $10^2$  K/s zatímco při procesu SLM je materiál ochlazován rychlostí až  $10^8$  K/s. Na plastické vlastnosti materiálu má velký vliv morfologie a velikost eutektického křemíku. Ten se při odlévání formuje do lamel a při procesu SLM se formuje do krychliček v jednotkách nanometrů. Forma „nano krychliček“ je daleko příznivější než forma lamel. [26]



Obr. 9: Mikrostruktura vzniklá (a) odléváním a (b) procesem SLM, eutectics-eutektikum, intermetallic phases-intermetalické fáze [26]

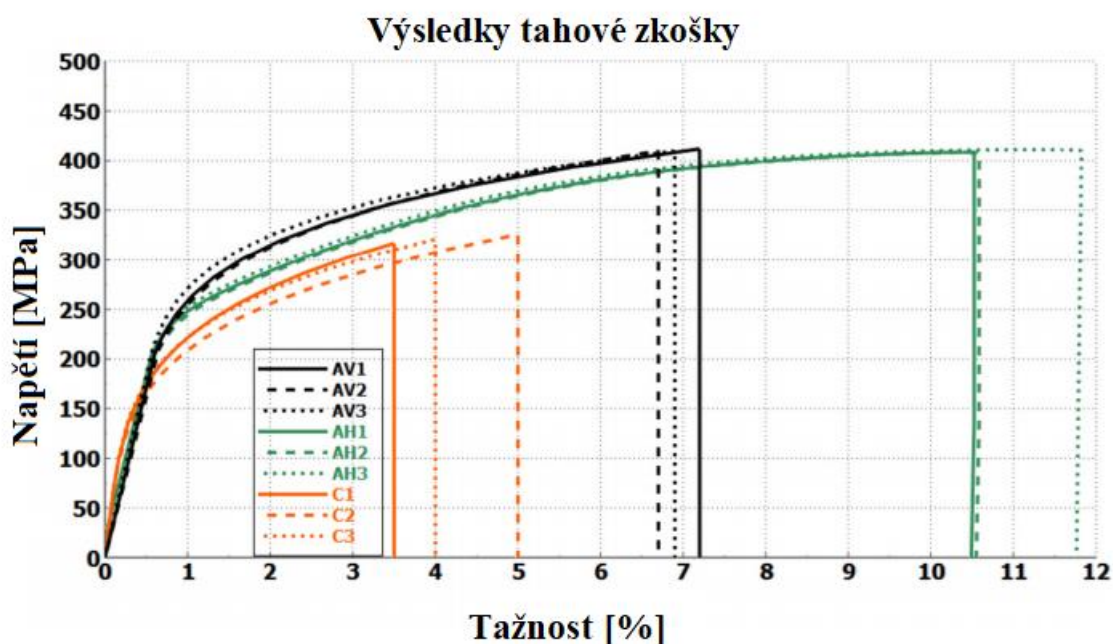
Tab. 2: Výsledky mechanických vlastností získaných z tahové a tlakové zkoušky [26]

Použitá technologie	Mez kluzu v tahu [MPa]	Mez pevnosti v tahu [MPa]	Tažnost [%]	Mez kluzu v tlaku [MPa]	Mez pevnosti v tlaku [MPa]	Tvrdost [HV]
SLM	219 ± 20	374 ± 11	1,9 ± 0,2	375 ± 30	752 ± 41	135,2 ± 4,8
Vysokotlaké lití	173 ± 14	257 ± 17	1,2 ± 0,5	342 ± 14	482 ± 58	108,1 ± 3,1

#### 4.2.2 Slitina AlSi10Mg

Slitina AlSi10Mg se tradičně vyrábí tlakovým litím. Používá se v automobilovém a kosmickém průmyslu, kvůli vysoké pevnosti a dobrým mechanickým vlastnostem. Je dobře svařitelná. Hořčík má významný vliv na proces stárnutí. [27]

Bharath a kol. [28] ve své práci zkoumali rozdíl mechanických vlastností mezi vzorky slitiny AlSi10Mg vyrobených metodou SLM a vzorky slitiny A360 (která má podobné chemické složení jako slitina AlSi10Mg) vyrobených odléváním. Vyrobili tři sady vzorků. První sada byla tištěna vertikálně vůči stavěcí desce (na obr.10 je tahový diagram těchto vzorků označen černou barvou), druhá sada byla tištěna horizontálně vůči stavěcí desce (na obr.10 je tahový diagram těchto vzorků označen zelenou barvou) a třetí sada byla vyrobena odléváním (na obr.10 je tahový diagram těchto vzorků označen oranžovou barvou). Na obr. 10 je zobrazen graf z tahové zkoušky, na kterém lze vidět, že vzorky vyrobené metodou SLM mají lepší mechanické vlastnosti než vzorky vyrobené odléváním. Také je zde vidět patrný nárůst tažnosti a z toho vyplývá, že odlité vzorky jsou křehčí. Rozdíl v tažnosti horizontálně vyrobených vzorků a vertikálně vyrobených vzorků je z důvodu toho, že u vertikálních vzorků je větší zbytkové napětí. Je to dáno tím, že je na sebe položeno více vrstev než u horizontálně tištěného vzorku. V tab. 3 jsou uvedeny konkrétní hodnoty mechanických vlastností u vzorků získaných z tahové zkoušky. [28]



Obr. 10: Výsledky z tahové zkoušky, AV-vertikální vzorek, AH-horizontální vzorek, C-odlitý vzorek [28]

Tab. 3: Výsledky mechanických vlastností slitin AlSi10Mg a A360 [28]

Vzorek	Tvrdost [HB]	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]
Horizontální vzorek vyrobený metodou SLM	121	241,7	408	10,5
Vertikální vzorek vyrobený metodou SLM	124	225	410	6,7
Vzorek vyrobený odléváním	75	165	321	4

V práci Dong a kol. [29] byla zkoumána mimo jiné i porozita na vzorcích o různých průměrech. Bylo zjištěno, že u vzorků s rostoucí velikostí průměru klesá porozita. Vliv na toto chování má zvětšený počet skenovacích stop, které musí být použity kvůli zvětšení plochy. Při nižším počtu skenovacích stop může dojít k nedostatku vynaložené energie, a to má za následek neúplné natavení a vznik pórů. Hodnoty porozity pro jednotlivé průměry jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4: Výsledky porozity pro různé hodnoty průměrů vzorků [29]

Průměr [mm]	1	2	3	4	5
Porozita [%]	1,87	1,26	0,57	0,12	0,10

## 5 Experimentální část

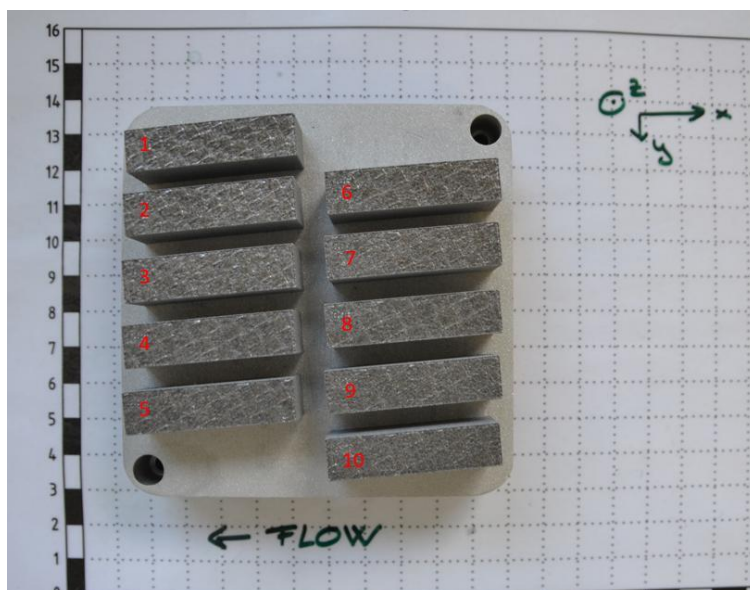
Experimentální část byla zaměřena na přípravu metalografických vzorků hliníkové slitiny AlSi9Cu3 vyrobených metodou SLM při různých procesních parametrech. U vzorků byla zkoumána mikrostruktura a pomocí obrazové analýzy byla vyhodnocena porozita.

### 5.2 Experimentální technika a postup prací

Vzorky byly vyrobeny na tiskárně SLM 280 HL s maximálním výkonem YLR vláknového laseru ( $P = 400 \text{ W}$ ) a 3D skenovací optikou. Vzorky pro tuto bakalářskou práci byly vyrobeny v ochranné atmosféře dusíku s použitím skenovací strategie chessboard. Celkově bylo vyrobeno 10 vzorků s různými procesními parametry. Přičemž použité procesní parametry jako výkon laseru ( $P = 350 \text{ W}$ ) a tloušťka vrstvy ( $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ) byly pro všechny vzorky stejné. Procesní parametry, které se měnily byla skenovací rychlost a rozteč skenování. Hodnoty těchto procesních parametrů pro jednotlivé vzorky jsou uvedeny v tab. 5. Na obr. 11 jsou zobrazeny označené vzorky, přičemž velikost vyrobených vzorků byla  $10 \times 14 \times 40 \text{ mm}$  (šířka  $\times$  výška  $\times$  délka).

Tab. 5: Procesní parametry vyrobených vzorků

		Rychlost skenování [mm/s]			
		1200	1300	1400	1500
Rozteč skenování [ $\mu\text{m}$ ]	120	-	Vzorek 1	Vzorek 2	Vzorek 3
	150	Vzorek 4	Vzorek 5	Vzorek 6	Vzorek 7
	170	Vzorek 8	Vzorek 9	Vzorek 10	-

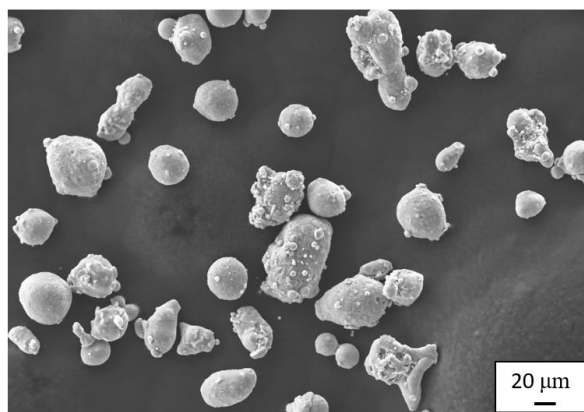


*Obr. 11: Označené vzorky společně s označením souřadnicového systému*

Pro následné měření relativní hustoty byly vytištěné vzorky rozřezány na pile ATM BRILLANT 220 na menší části. Ty byly následně zalisovány pomocí lisu ATM-OPAL X-P50 do směsi hmot Dentacryl a Multifast green. Následně byly vzorky broušeny za mokra na Pedeminu DAP-7 od firmy Struers. Byly použity brusné papíry od zrnitosti P220 až po zrnitost P4000. Poté byly vzorky leštěny s použitím diamantové pasty o zrnitosti 3  $\mu\text{m}$  a 0,7  $\mu\text{m}$ . Během leštění byla plátina smáčena ethanolem. Na vyleštěných nenaleptaných vzorcích byla měřena porozita pomocí obrazové analýzy (ImageJ). Poté byl vzorek s nejmenší porozitou naleptán leptadlem Keller (složení: kyselina chlorovodíková, kyselina dusičná a kyselina fluorovodíková) a byla pozorována jeho mikrostruktura.

### 5.3 Charakteristika vstupního prášku

Prášek použitý na výrobu vzorků byl od firmy SLM Solution. Průměrná velikost částic prášku byla 42,3  $\mu\text{m}$ . Morfologie prášku byla jak sférická, tak i nepravidelného tvaru viz obr. 12.



*Obr. 12: Morfologie použitého prášku slitiny AlSi9Cu3 (SEM)*

## 6 Výsledky

Jak už bylo zmíněno, bylo vyrobeno 10 vzorků procesem SLM s různými hodnotami procesních parametrů. Na všech vzorcích byl zhotoven metalografický výbrus ve směrech XY a YZ. Porozita byla vyhodnocována na neleptaných metalografických výbrusech ve směrech XY a YZ pomocí obrazové analýzy. Hodnota výsledné porozity vznikla aritmetickým průměrem hodnot obou směrů. Při obrazové analýze byl brán zřetel na podpovrchovou porozitu a při měření porozity byl její vliv na výslednou porozitu redukován. Výsledky porozity pro jednotlivé vzorky jsou zobrazeny v tab. 6.

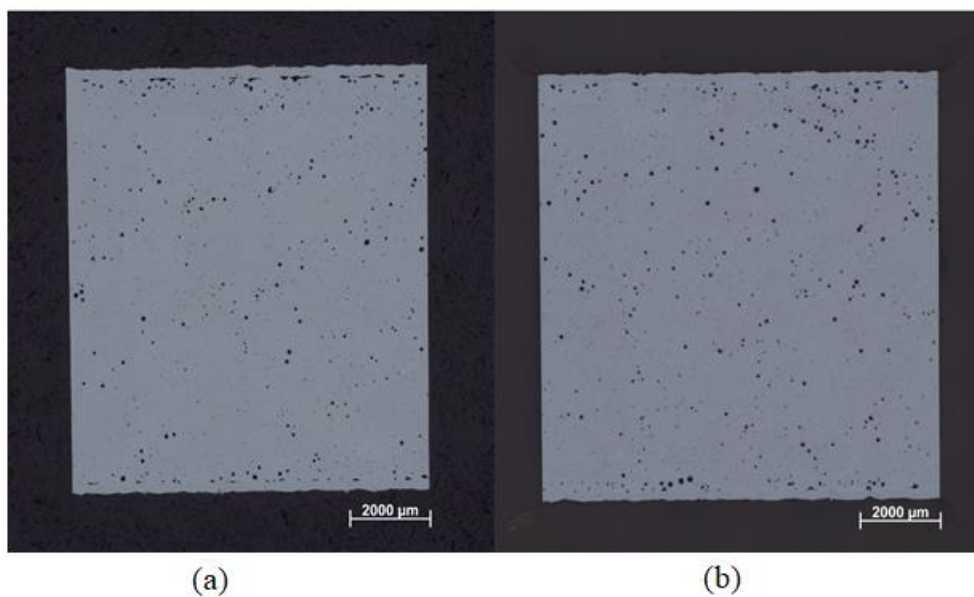
*Tab. 6: Výsledky porozity získané obrazovou analýzou*

	Porozita ve směru XY	Porozita ve směru YZ	Výsledná porozita [%]
Vzorek 1	1,156	1,624	1,390
Vzorek 2	0,828	1,440	1,134
Vzorek 3	1,327	1,322	1,325
Vzorek 4	1,053	1,255	1,154
Vzorek 5	0,986	1,058	1,022
Vzorek 6	1,279	1,180	1,230
Vzorek 7	0,968	1,151	1,060
Vzorek 8	1,137	1,064	1,101
Vzorek 9	1,114	1,251	1,183
Vzorek 10	1,023	1,352	1,188

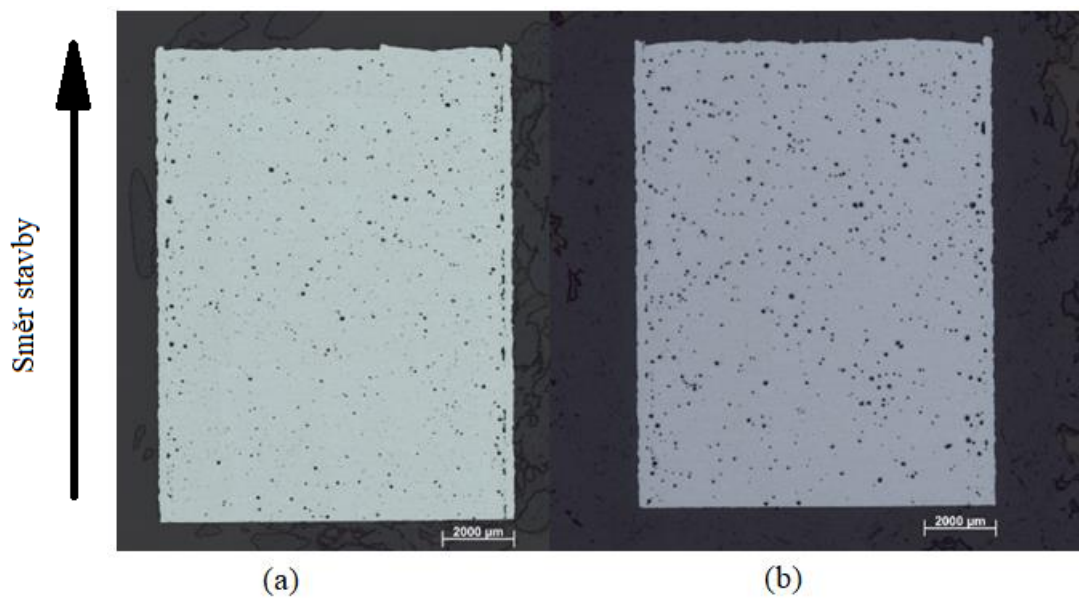
Z výsledků uvedených v tab. 6 je patrné, že jako nejvíce porézní byl vyhodnocen vzorek 1, který byl vyráběn při procesních parametrech: výkon laseru ( $P = 350 \text{ W}$ ), tloušťka vrstvy ( $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ), rozteč skenování ( $h = 120 \text{ }\mu\text{m}$ ) a rychlost skenování ( $1300 \text{ mm/s}$ ). Jako nejméně porézní byl vyhodnocen vzorek 5, který byl vyráběn při procesních parametrech: výkon laseru ( $P = 350 \text{ W}$ ), tloušťka vrstvy ( $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ), rozteč skenování ( $h = 150 \text{ }\mu\text{m}$ ) a rychlost skenování ( $v = 1300 \text{ mm/s}$ ). Na obr. 13 je porovnání ve směru XY vzorku 5, který vyšel jako nejméně porézní, a vzorku 1, který vyšel jako nejvíce porézní. Na obr. 14 je porovnání stejných vzorků, ale ve směru YZ.



Směr stavby



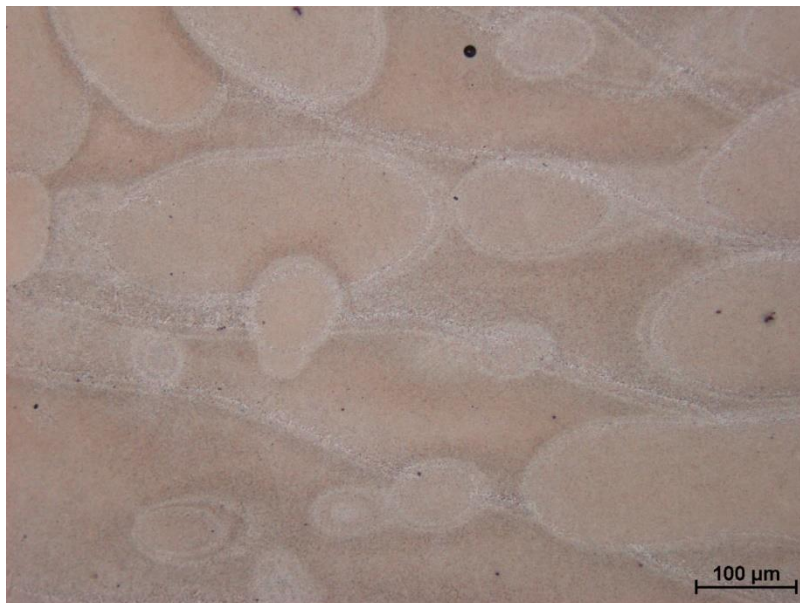
Obr. 13: Porovnání mikrostruktury vzorků ve směru XY (a) vzorku 5 a (b) vzorku 1



Obr. 14: Porovnání mikrostruktury vzorků ve směru YZ (a) vzorku 5 a (b) vzorku 1

Na obr. 15 a obr. 16 je zobrazena mikrostruktura naleptaného vzorku. Jedná se o vzorek 5, který jak bylo zmíněno výše byl vyhodnocen jako nejméně porézní. Z toho důvodu byl tento vzorek naleptán a následně byla pozorována jeho mikrostruktura. Na obou snímcích mikrostruktury bylo možno pozorovat póry s kulovou morfologií a dobře definované fúzní hranice SLM buněk.

Směr stavby



*Obr. 15: Mikrostruktura naleptaného vzorku 5 ve směru XY*

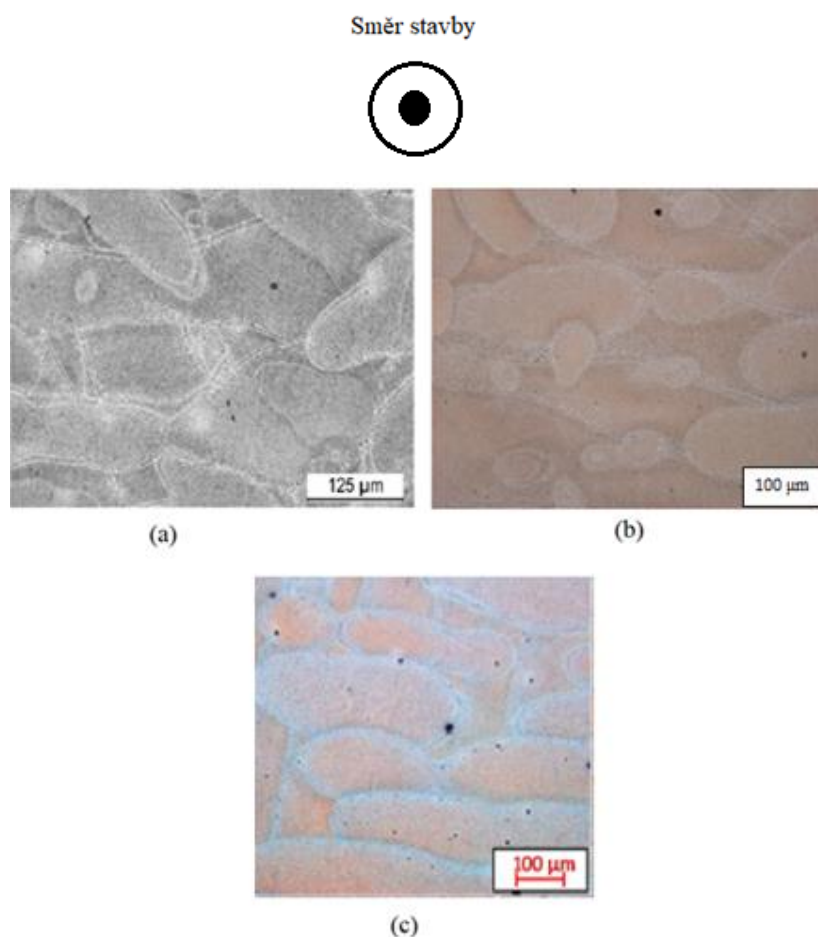


*Obr. 16: Mikrostruktura naleptaného vzorku 5 ve směru YZ*

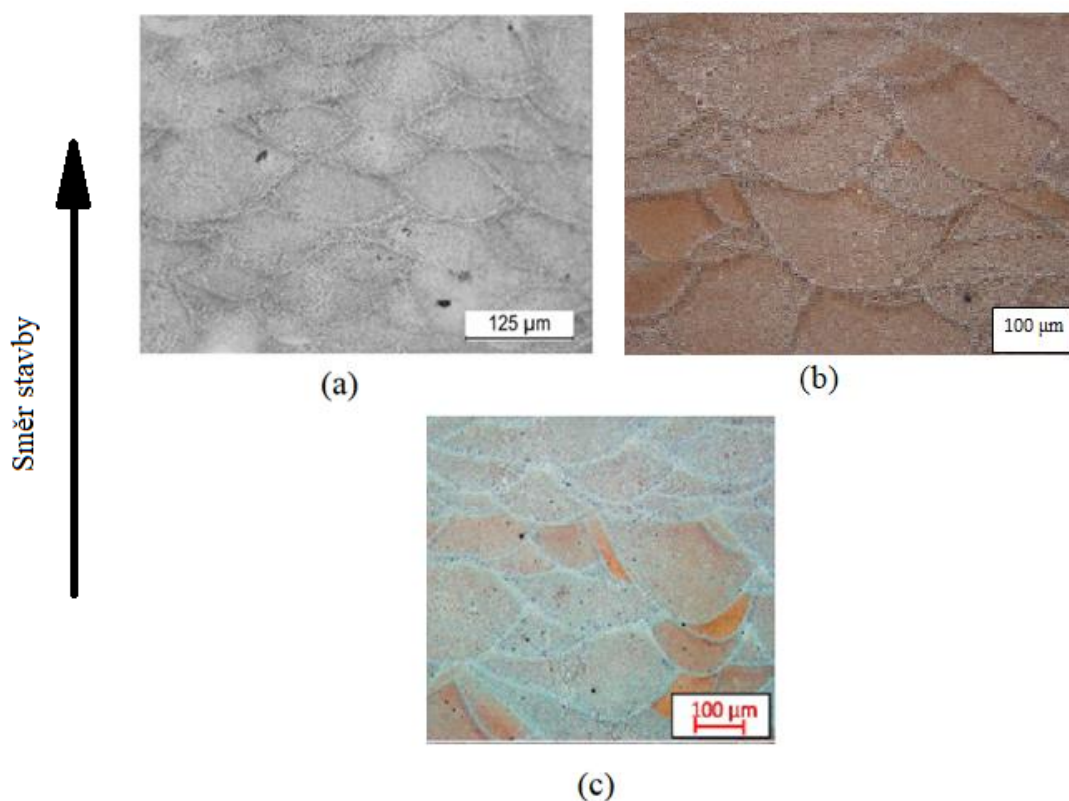
## 7 Diskuze

Bakalářská práce se zabývala mikrostrukturou slitiny  $\text{AlSi9Cu3}$  vyrobenou metodou SLM. Rešeršní část byla rozdělena do kapitol zabývajících se metodou SLM, vadami vznikajícími během procesu SLM, hliníkem a jeho slitinami. Experimentální část se zabývala přípravou vzorků slitiny  $\text{AlSi9Cu3}$  vyrobených metodou SLM.

V této bakalářské práci byla vyhodnocována porozita ve směrech XY a YZ, zatímco v pracích Suchý a kol. [25] a Fiocchi a kol. [30], byly vyhodnocovány směry XY a XZ. Ovšem směry XZ a YZ jsou si podobné, protože jsou orientovány ve směru stavby a lze je proto porovnat. Na obr.17 a obr.18 je zobrazeno porovnání mikrostruktur z práce [25], [30] a z této bakalářské práce. Na obr.18 je porovnání mikrostruktury ze dvou různých směrů, a to ze směru XZ a YZ. Mikrostruktura ze všech tří prací vykazuje podobné charakteristické rysy, jelikož se ve všech případech jedná o slitinu  $\text{AlSi9Cu3}$  vyrobenou metodou SLM.



*Obr. 17: Porovnání mikrostruktur slitiny  $\text{AlSi9Cu3}$  ve směru XY z prací (a) Fiocchi a kol. [30], (b) této bakalářské práce, (c) Suchý a kol. [25]*



Obr. 18: Porovnání mikrostruktur slitiny  $AlSi9Cu3$  z prací (a) Fiocchi a kol. [30] ve směru XZ, (b) této bakalářské práce ve směru YZ, (c) Suchý a kol. [25] ve směru XZ

Porozita se často spojuje s hodnotami hustoty energie [30]. Pro srovnání hustot energie je nejprve nutno zmínit, že v práci [30] byl pro výrobu vzorků použit pulzní laser, naopak pro výrobu vzorků v této bakalářské práci byl použit kontinuální laser. Při použití pulzního laseru se rovnice pro výpočet hustoty energie trochu liší od rovnice (1), která se používá pro výpočet hustoty energie při použití kontinuálního laseru. Z tohoto důvodu jsou tyto energie obtížně porovnatelné, ovšem jako hrubý odhad lze toto porovnání použít.

V práci [30] bylo dosaženo nejmenší porozity (hodnota porozity byla 0,13%) u vzorku, kde hustota energie odpovídala hodnotě  $45,3 \text{ J/mm}^3$  (kde procesní parametry byly: výkon laseru  $P = 275 \text{ W}$ , tloušťka vrstvy  $t = 30 \text{ μm}$ , rozteč skenování  $h = 90 \text{ μm}$ , doba pulzu  $t_{\text{exp}} = 40 \text{ μs}$ ). Podobné hodnoty hustoty energie ( $E_v = 44,87 \text{ J/mm}^3$ ) bylo dosaženo při výrobě vzorku 1 ( $P = 350 \text{ W}$ ,  $t = 50 \text{ μm}$ ,  $h = 120 \text{ μm}$  a  $v = 1300 \text{ mm/s}$ ). Navzdory podobné hustotě energie, byl vzorek 1 vyhodnocen naopak jako nejvíce porézní.

V práci [30] bylo také zjištěno, že vzorek vyrobený při hustotě energie  $28,8 \text{ J/mm}^3$  ( $P = 350 \text{ W}$ ,  $t = 30 \text{ μm}$ ,  $h = 90 \text{ μm}$  a  $t_{\text{exp}} = 20 \text{ μs}$ ) měl skoro o 5 % vyšší hodnotu porozity než vzorek vyrobený při hustotě energie  $45,3 \text{ J/mm}^3$ . U vzorků vyrobených pro tuto bakalářskou práci nebyl zaznamenán takto velký rozdíl. Porozita vzorku 10 vyrobeného při hustotě energie  $29,4 \text{ J/mm}^3$  ( $P = 350 \text{ W}$ ,  $t = 50 \text{ μm}$ ,  $h = 170 \text{ μm}$  a  $v = 1400 \text{ mm/s}$ ) se od hodnoty porozity vzorku 1 ( $E_v = 44,87 \text{ J/mm}^3$ ) lišila pouze o 0,2 %.

V této práci byl jako vzorek s nejmenší porozitou vyhodnocen vzorek 5 vyrobený při hustotě energie  $35,9 \text{ J/mm}^3$  ( $P = 350 \text{ W}$ ,  $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ,  $h = 150 \text{ }\mu\text{m}$  a  $v = 1300 \text{ mm/s}$ ).

Jak již bylo zmíněno výše, hodnoty energie pro různé typy laserů nelze zcela porovnávat. Nicméně z dosažených výsledků také vyplývá, že podobné hodnoty hustoty energií nezaručí stejné výsledné hodnoty porozity. Při procesu zpracování materiálů pomocí metody SLM je důležité také vzít v potaz, že různými hodnotami procesních parametrů lze dosáhnout stejné hustoty energie, ale jiných výsledků hodnot porozity. Výslednou mikrostrukturu může ovlivnit i kvalita a tvar kovového prášku, strategie skenování, předehřev stavěcí desky, předehřev komory a použitý ochranný plyn.

## 8 Závěr

- V rámci bakalářské práce bylo vyrobeno 10 vzorků metodou SLM s různými procesními parametry.
- Pomocí obrazové analýzy bylo zjištěno, že i přes široký rozsah hodnot procesních parametrů byl rozdíl porozity jednotlivých vzorků v řádech desetin %.
- Největší relativní hustotu (nejmenší porozitu) vykazoval vzorek 5 (kde procesní parametry byly: výkon laseru ( $P = 350 \text{ W}$ ), tloušťka vrstvy ( $t = 50 \text{ }\mu\text{m}$ ), rozteč skenování ( $h = 150 \text{ }\mu\text{m}$ ) a rychlost skenování ( $v = 1300 \text{ mm/s}$ )).
- Vzorky vyhodnocované v této bakalářské práci měly při stejné hodnotě hustoty energie v porovnání s literaturou rozdílné hodnoty porozity, a to v řádu jednotek %.
- Na vyrobených vzorcích byly pozorovány především póry pravidelného (kulovitěho) tvaru.
- Mikrostruktura v naleptaném stavu vykazovala stejné charakteristické rysy v porovnání s literaturou.



## 9 Seznam použité literatury

- [1] NURHUDAN, Aghnia Ilmiah, Sugeng SUPRIADI, Yudan WHULANZA a Agung Shamsuddin SARAGIH. Additive manufacturing of metallic based on extrusion process: A review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2021, (vol.66), 228-237. ISSN 1526-6125.
- [2] WANG, Pei, Jürgen ECKERT, Konda-gokuldoss PRASHANTH, Ming-wei WU, Ivan KABAN, Li-xia XI a Sergio SCUDINO. A review of particulate-reinforced aluminum matrix composites fabricated by selective laser melting. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2020, (vol.30), 2001-2034. ISSN 1003-6326.
- [3] ANAND, Nitesh, Kai-Chun CHANG, Pei-Chen HUANG, An-Chou YEH, Chen-Wei TSAI, Chang-Chun LEE, Ming-Tsang LEE a Yu-Bin CHEN. An effective and efficient model for temperature and molding appearance analyses for selective laser melting process. *Journal of Materials Processing Technology*. 2021, (vol.294). ISSN 0924-0136.
- [4] REYES, Antonio Enrique Salas, Gerardo Altamirano GUERRERO, Gabriel Rodríguez ORTIZ, José Reyes GASGA, Jaime Francisco García ROBLEDO, Octavio Lozada FLORES a Patricia Sheilla COSTA. Microstructural, microscratch and nanohardness mechanical characterization of secondary commercial HPDC AlSi9Cu3-type alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020, (vol.9), 8266-8282. ISSN 2238-7854.
- [5] QBAU, N., N.D. NAM, N.T. HIEN a N.X. CA. Development of light weight high strength aluminum alloy for selective laser melting. *Journal of Materials Research and Technology*. (vol.9), 14075-14081. ISSN 2238-7854.
- [6] DYNIN, N.V., V.V. ANTIPOV, D.V. KHASIKOV, I. BANARIEB, A.V. ZAVODOV a A.G. EVGENOV. Structure and mechanical properties of an advanced aluminium alloy AlSi10MgCu(Ce,Zr) produced by selective laser melting. *Materials Letters*. 2021, (vol.284). ISSN 0167-577X.
- [7] TAMEZ, Manuel B. Arriallaga a Iman TAHA. A review of additive manufacturing technologies and markets for thermosetting resins and their potential for carbon fiber integration. *Additive Manufacturing*. 2021, (37). ISSN 2214-8604.
- [8] ZÍTKA, Lukáš. Inovace 3D tiskárny typu Rep Rap. Brno 2017. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 69 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Josef SEDLÁK, Ph.D.

- [9] Lai-Chang Zhang, Jincheng Wang, Yujing Liu, Zhe Jia, Shun-Xing Liang, Additive Manufacturing of Titanium Alloys, Reference Module in Materials Science and Materials Engineering, Elsevier, 2020, ISBN 9780128035818,
- [10] SONG, Xu, Wei ZHAI, Rui HUANG, Jin FU, Mingwang FU a Feng LI. Metal-Based 3D-Printed Micro Parts & Structures. *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. Elsevier, 2020. ISBN 9780128035818.
- [11] Schematic diagram of the selective laser melting (SLM) process. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-18]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-selective-laser-melting-SLM-process\\_fig1\\_326891428](https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-selective-laser-melting-SLM-process_fig1_326891428)
- [12] SIMSON, Thomas, Andreas EMMEL, Anja DWARS a Juliane BÖHM. Residual stress measurements on AISI 316L samples manufactured by selective laser melting. *Additive Manufacturing*. 2017, (vol. 17), 183-189. ISSN 2214-8604.
- [13] FANG, Ze-Chen, Zhi-Lin WU, Chen-Guang HUANG a Chen-Wu WU. Review on residual stress in selective laser melting additive manufacturing of alloy parts. *Optics & Laser Technology*. 2020, (vol. 129). ISSN 0030-3992.
- [14] MERCELIS, Peter a Jean-Pierre KRUTH. Residual stresses in selective laser sintering and selective laser melting. *Rapid Prototyping Journal*. 2006, (vol.12), 254-265. ISSN 1355-2546.
- [15] SINGLA, Anil Kumar, Mainak BANERJEE, Aman SHARMA, et al. Selective laser melting of Ti6Al4V alloy: Process parameters, defects and post-treatments. *Journal of Manufacturing Processes*. Elsevier, 2021, (64), 161-187. ISSN 1526-6125.
- [16] Li, R., Liu, J., Shi, Y. *et al.* Balling behavior of stainless steel and nickel powder during selective laser melting process. *Int J Adv Manuf Technol* **59**, 1025–1035 (2012). <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3566-1>.
- [17] ZHANG, Jinliang, Bo SONG, Qionsong WEI, Dave BOURELL a Yusheng SHI. A review of selective laser melting of aluminum alloys: Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*. 2019, (vol.35), 270-284. ISSN 1005-0302.
- [18] MAJEED, Afran, Yingfeng ZHANG, Jingxiang LV, Tao PENG, Zahid ATTA a Altaf AHMED. Investigation of T4 and T6 heat treatment influences on relative density and porosity of AlSi10Mg alloy components manufactured by SLM. *Computers & Industrial Engineering*. 2020, (vol.139). ISSN 0360-8352.
- [19] OLAKANMI, E. O., R. F. COCHRANE and K. W. DALGARNO. A review on selective laser sintering/melting (SLS/SLM) of aluminium alloy powders: Processing, microstructure, and properties. *Progress in Materials Science*, 74 (2015), 401–477. ISSN 0079-6425.



- [20] Shrestha, Subin & Starr, Thomas & Chou, Kevin. (2019). A Study of Keyhole Porosity in Selective Laser Melting: Single-Track Scanning With Micro-CT Analysis. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 141. 1. 10.1115/1.4043622.
- [21] LOUVIS, Eleftherios, Peter FOX a Christopher J. SUTCLIFFE. Selective laser melting of aluminium components. *Journal of Materials Processing Technology*. 2011, (vol.211), 275-284. ISSN 0924-0136.
- [22] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1999. ISBN 80-7204-130-4.
- [23] MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. 1. vyd. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. 700 s.: il. ISBN: 8089041884
- [24] Vojtěch D.: *Kovové materiály*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [25] SUCHY, J., L. PANTELEJEV, D. PALOUSEK, D. KOUTNY and J. KAISER. Processing of AlSi9Cu3 alloy by selective laser melting. *Powder Metallurgy*, 2020, 63(3), s. 197-211. doi.org/10.1080/00325899.2020.1792675. ISSN 0032-5899.
- [26] FOUSOVA, M., D. DVORSKY, M. VRONKA, D. VOJTECH and P. LEJCEK. The Use of Selective Laser Melting to Increase the Performance of AlSi9Cu3Fe Alloy. *Materials*. 2018, 11(10). DOI: 10.3390/ma11101918. ISSN 1996-1944.
- [27] READ, Noriko, Wei WANG, Khamis ESSA a Moataz M. ATTALLAH. Selective laser melting of AlSi10Mg alloy: Process optimisation and mechanical properties development. *Materials & Design*. 2015, (vol.65), 417-424. ISSN 0261-3069.
- [28] BHARATH, Channappa, V. SHAMANTH a K. HEMANTH. Studies on mechanical behaviour of AlSi10Mg alloy produced by Selective Laser Melting and A360 alloy by die casting. *Materials today:Proceedings*. 2020. ISSN 2214-7853.
- [29] Dong, Z.; Zhang, X.; Shi, W.; Zhou, H.; Lei, H.; Liang, J. Study of Size Effect on Microstructure and Mechanical Properties of AlSi10Mg Samples Made by Selective Laser Melting. *Materials* **2018**, 11, 2463.
- [30] FIOCCHI, J., C. A. BIFFI and A. TUISSI. Selective laser melting of high-strength primary AlSi9Cu3 alloy: Processability, microstructure, and mechanical properties. *Materials & Design*, 2020, s. doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108581. ISSN 02641275.

## 10 Seznam použitých zkratk a symbolů

Zkratka/symbol	Jednotka	Popis
$h$	[mm]	Rozteč skenování
$t, H$	[mm]	Tloušťka vrstvy
$t_{exp}$	[ $\mu s$ ]	Doba pulsu
$v$	[mm/s]	Rychlost skenování
2D	[-]	Dvojměrný
3D	[-]	Trojměrný
AM	[-]	Aditivní výroba
$E_v$	[J/mm <sup>3</sup> ]	Hustota energie
FCC	[-]	Kubická plošně centrovaná mřížka
$P$	[W]	Výkon laseru
$R_m$	[MPa]	Mez pevnosti
SEM	[-]	Rastrovací elektronový mikroskop
SLA	[-]	Stereolitografie
SLM	[-]	Selektivní laserové tavení
STL	[-]	Standardní teslační soubor
TGM	[-]	Mechanismus teplotního gradientu

## 11 Seznam obrázků

- Obr.1 Předpověď globálního trhu
- Obr.2 Rozdělení aditivních technologií
- Obr.3 Schéma zařízení pro selektivní laserové tavení
- Obr.4 Vývoj napětí během procesu AM při (a) ochlazování (termální komprese) a (b) ohřevu (termální expanze) nové vrstvy
- Obr.5 Schéma znázorňující zablokování pohybu nanášecího válce v důsledku tvorby kulových částic
- Obr.6 Formovací mechanismy a morfologie oxidického filmu. (a) Narušení tavné lázně oxidy. (b) Stěny oxidického filmu
- Obr.7 Schéma obecného rovnovážného diagramu binárních slitin hliníku
- Obr.8 Binární rovnovážný diagram Al-Si
- Obr.9 Mikrostruktura vzniklá (a) odléváním a (b) procesem SLM, eutectics-eutektikum, intermetallic phases-intermetalické fáze
- Obr.10 Výsledky z tahové zkoušky, AV-vertikální vzorek, AH-horizontální vzorek, C-odlitý vzorek
- Obr.11 Označené vzorky společně s označením souřadnicového systému
- Obr.12 Morfologie použitého prášku slitiny AlSi9Cu3 (SEM)
- Obr.13 Porovnání mikrostruktury vzorků ve směru XY (a)vzorku 5 a (b)vzorku 1
- Obr.14 Porovnání mikrostruktury vzorků ve směru YZ (a) vzorku 5 a (b) vzorku 1
- Obr.15 Mikrostruktura naleptaného vzorku 5 ve směru XY
- Obr.16 Mikrostruktura naleptaného vzorku 5 ve směru YZ
- Obr.17 Porovnání mikrostruktur slitiny AlSi9Cu3 ve směru XY z prací (a) Fiocchi a kol. [30], (b) této bakalářské práce, (c) Suchý a kol. [25]
- Obr.18 Porovnání mikrostruktur slitiny AlSi9Cu3 z prací (a) Fiocchi a kol. [30] ve směru XZ, (b) této bakalářské práce ve směru YZ, (c) Suchý a kol. [25] ve směru XZ

## **12 Seznam tabulek**

Tab.1 Vlastnosti hliníku

Tab.2 Výsledky mechanických vlastností získaných z tahové a tlakové zkoušky

Tab.3 Výsledky mechanických vlastností slitin AlSi10Mg a A360

Tab.4 Výsledky porozity pro různé hodnoty průměrů vzorků

Tab.5 Procesní parametry vyrobených vzorků

Tab.6 Výsledky porozity získané obrazovou analýzou